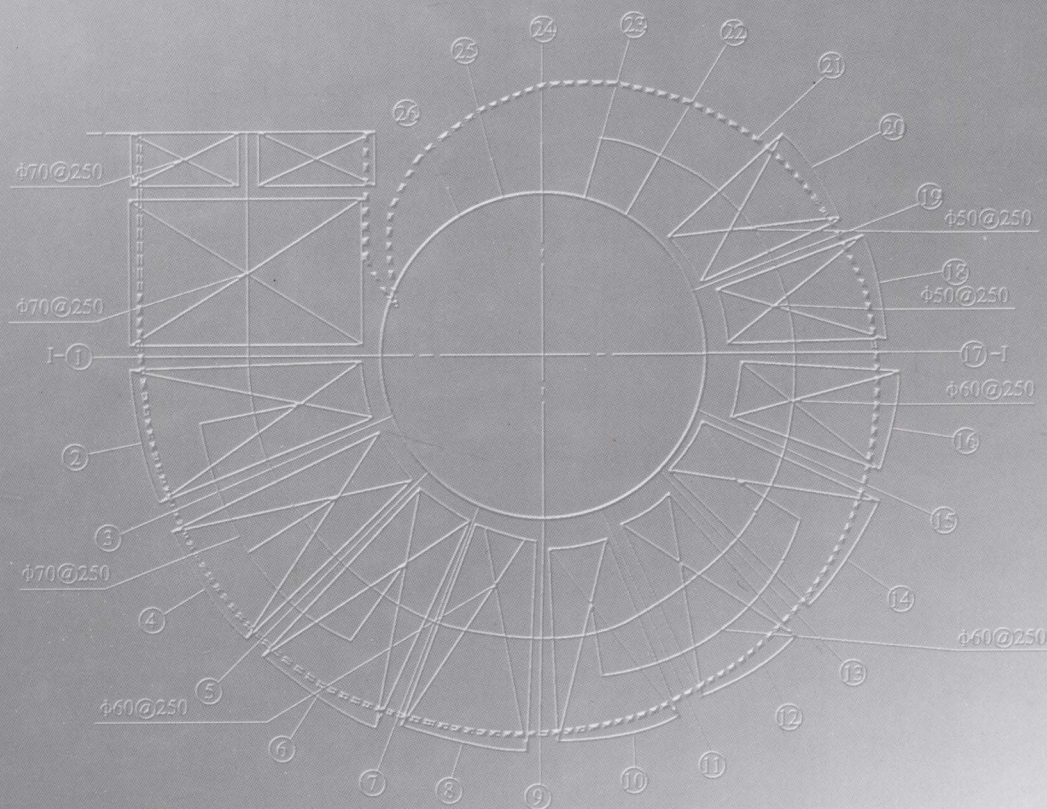


大型水电站蜗壳结构设计理论与工程实践

伍鹤皋 马善定 秦继章 编著



科学出版社
www.sciencep.com

大型水电站蜗壳结构设计理论与工程实践

伍鹤皋 马善定 秦继章 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书收集了大量资料,对国内外五十多年来水电站蜗壳结构设计理论和工程实践进行了全面总结与回顾,介绍了水电站蜗壳结构设计理论研究和应用的最新进展。在此基础上结合国内许多大中型水电站的工程实际,对蜗壳结构进行了比较全面、深入的研究,包括工程设计、数值计算、模型试验、原型观测分析等。最后,对今后大中型水电站蜗壳结构型式的选择和改进提出了建议。

本书内容翔实、资料丰富,对水电站蜗壳结构的设计、技术研究等都有重要参考价值,可供水利水电行业广大工程技术人员及相关专业的高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型水电站蜗壳结构设计理论与工程实践 / 伍鹤皋, 马善定, 秦继章编著. —北京: 科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-025684-3

I. 大… II. ①伍…②马…③秦… III. ①水力发电站—壳体(结构)—结构设计②水力发电站—壳体(结构)—工程施工 IV. TU271.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 174386 号

责任编辑: 李 敏 王 倩 / 责任校对: 刘小梅

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达版艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2009 年 10 月第一次印刷 印张: 28 插页: 2

印数: 1—1 000 字数: 700 000

定价: 98.00 元

如有印装质量问题, 我社负责调换

本书的研究得到了教育部优秀青年教师资助计划项目“超大型水电站水轮机蜗壳结构型式研究”（项目号：20011879）和水资源与水电工程科学国家重点实验室（武汉大学）重点研究项目“高坝大库的系统特性演化与安全评价”的资助。

序

水电资源是可再生的清洁能源，在全球有机燃料储藏有限而且又面临日趋严重的环境污染压力的情况下，在有条件的地区，开发水电是必然的选择，因此我国政府把积极开发水电列为能源建设的重要组成部分。我国蕴藏和可开发的水力资源居世界首位，截至 2008 年底我国已开发的水力资源还不到技术可开发量的 30%，水电建设的前景极为广阔。

改革开放以来，我国水电建设发展速度前所未有，并已建成或正在建设一批大容量、高水头的大型水电站，其中三峡水电站、溪洛渡水电站和小湾水电站等在机组容量和坝高等方面已跃居世界之最。

高水头、大单机容量的水轮发电机组是大型水电站的核心构成部分，无论是在技术性能还是在电站安全运行等方面，对它们都有很高的要求。作为机组和水电站厂房重要组成部分的蜗壳结构，在大容量、高水头水电站设计和建设中备受重视。从 20 世纪 90 年代初三峡水电站提出设计方案开始，直到 2008 年坝后厂房 26 台水轮发电机组全部投产的十多年中，对蜗壳结构的形式选择、结构设计、安全保证、施工方法、监测等方面，进行了大量、深入的研究。其研究工作的时间、投入的人力和物力、广度和深度以及获得的成果是迄今世界水电建设史上罕见的。在此基础上，三峡水电站蜗壳结构分别采用了充水保压、垫层和直埋（完全联合承载）三种方式，并做到安全运行，为我国大型蜗壳结构设计和建设积累了丰富的经验。

与此同时，结合我国其他大型电站的水轮机蜗壳结构，也进行了广泛深入的研究、论证和设计，取得了丰硕的成果。

所有这些成果和经验都是我国水电建设的宝贵财富，迫切需要及时加以系统整理和总结，以利指导今后的工作。该书在国内首次做了这方面有益的尝试。

该书作者是高等学校从事水电站专业教学和科研工作的学者，长期进行包括蜗壳结构在内的水电站建筑物研究，承担了三峡水电站等国内大多数大

型水电站蜗壳和管道结构的研究与咨询工作，其科研成果为工程所采用，取得了良好的技术经济效益。

该书详尽地收集和整理了近半个世纪以来国内外高水头水电站蜗壳结构的典型工程实例，结合这些工程所进行的设计、研究、建造，以及发生的问题和解决的措施，从中可以清晰地看到蜗壳结构的演变、进步和创新的过程和规律，对今后的技术进步具有良好的借鉴和启发作用。

该书介绍了大型蜗壳结构强度和变形的数值分析和模型试验的方法和成果，反映了蜗壳结构设计计算方法的当前水平和成就。

该书的重点是高水头大型蜗壳结构型式的分析和优化，总结了几种主要结构型式的优缺点、存在的问题和适用情况，做出了合理评价，提出了结构形式选择的建议。

该书的特点是从理论和实际两个方面，总结和分析了国内外现行的大型蜗壳结构强度设计方法和原理、存在的问题，并提出了具有创新性的改进意见和原则性的设计方法，经过进一步研究落实，可用于工程实践，将会取得保证结构安全、降低造价和缩短工期的良好效果。

该书列出了有关蜗壳结构的大量详尽的文献目录，对从事这方面工作的专业人员提供了很大方便。

我国一批大型水电站正陆续建成投产，运行经验和对建筑物的考验结果正在积累。我们期待在该书的基础上，作者和其他专家能继续不断总结新的成就和经验，为专业人员提供新的知识，推进我国水电技术进步和建设事业的发展。

张超然

2009年8月

前 言

蜗壳结构是水轮机的重要部件，也是水电站厂房中的重要建筑物，它的任务是向水轮机提供平稳水流和承受水轮发电机组的静动荷载。蜗壳结构直接影响机组的稳定安全运行，是电站建设中重要的技术经济问题。

当前正是我国水电站建设前所未有的繁荣时期，其规模和技术水平发展迅速，已位居世界前列。水轮机蜗壳结构也是这样，单机容量已达700MW。近年来我国结合一批特大型水电站的建设，对蜗壳结构的设计和研究，开展了长期、大量的工作，取得了丰富成果，实现了技术革新。但是迄今国内外尚无较系统反映蜗壳结构技术历史发展和最新成就的技术专著，而这正是当前总结经验、继续推动技术进步所需要的。

二十多年来，作者及其研究集体结合国内许多大中型水电站的工程实际，对蜗壳结构进行了比较全面、深入的研究，包括工程调查、设计、数值计算、模型试验、原型观测分析等。在上述工作的基础上，本书对国内外五十多年来水电站蜗壳结构设计原理、研究成果和工程实践进行了初步总结分析，在一定程度上反映了这方面的发展过程和最新成果，同时也提出了作者对一些关键技术问题的见解和建议。

本书主要是研究蜗壳结构的静态工作特性。蜗壳结构在振动状态下的特性，国内外的研究工作相对较少，有待积累经验，加以总结。

作者没有把蜗壳结构的设计任务和内容、设计步骤、设计计算方法等具体内容的详细说明和介绍作为本书的主要任务，也没有讨论蜗壳结构的制造和施工。我们期待有关方面在修订设计规程、编撰专门的设计手册时，能完成这一任务。

由于条件限制，本书编撰所依据的资料还不很全面。例如，未能反映西方、日本等国家直埋式蜗壳结构的资料和经验，我们期待对此有研究的读者能共同来补充和完善。

在本书编写时，除了引用已公开发表的文献外，利用和参考了作者和

其研究集体完成的各种技术研究报告，还利用了作者在参与工程项目设计和研究工作的讨论、评审等活动中得到的资料信息。第1章1.2节~1.8节取自莫斯科水工研究院谢·叶·利西齐金博士提供的，由莫尔多维娜工程师编写的技术报告。虽然这是多年前的资料，但是不失其历史意义，而且从中可以看到专业技术人员认真的敬业精神和创新努力。作者对提供国内各工程资料和研究成果及大力支持的单位，特别是长江水利委员会和长江勘测规划设计研究院、中国长江三峡工程开发总公司、中南勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、成都勘测设计研究院、西北勘测设计研究院等表示衷心感谢。

与作者共同参与研究工作的有匡会键、熊德炎、龚国芝老师，苏凯、蒋逵超、何勇、申艳、张启灵、黄小艳、石长征、阳芳、韩前龙等硕士、博士研究生，对他们的贡献，致以诚挚谢意。向给予本书出版大力支持的武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室和水电学院及同事们致谢。

大连理工大学马震岳教授对本书进行了审阅，并提出了许多建设性的意见和建议；中国长江三峡工程开发总公司张超然院士为本书作序，作者深感荣幸，并致诚挚感谢。

本书由伍鹤皋策划、组织和统编，并编写了第3章（3.1节除外）和第4章中的4.4节；秦继章编写了第3章中的3.1节和第4章（4.4节除外），马善定编写了其余各章。由于作者水平有限，收集资料受到条件限制，本书内容不尽完善，不足与疏漏难免，热诚欢迎读者批评指正。

作 者

2009年6月于武汉

目 录

序

前言

第 1 章 水电站蜗壳结构设计理论与技术综述	1
1.1 蜗壳结构型式	1
1.2 水电站蜗壳发展概况	6
1.3 垫层蜗壳的研究改进与实践	8
1.4 加箍钢蜗壳及加肋钢蜗壳的研究	10
1.5 预应力钢筋混凝土蜗壳的研究	12
1.6 混合结构（钢衬钢筋混凝土完全联合承载结构）蜗壳	14
1.7 各种蜗壳结构类型的经济比较	16
1.8 蜗壳结构各种方案的结论	17
1.9 经验与启示	17
参考文献	18
第 2 章 蜗壳结构的设计方法	20
2.1 我国蜗壳结构设计方法	20
2.2 原苏联钢衬钢筋混凝土蜗壳的设计方法、构造及工艺	22
2.3 钢蜗壳和外围钢筋混凝土工作机理及设计方法改进	32
参考文献	40
第 3 章 大型水电站蜗壳结构数值仿真计算研究	41
3.1 三峡水电站充水保压蜗壳数值仿真计算	42
3.2 龙滩水电站垫层蜗壳数值仿真计算	48
3.3 三峡水电站 15#机组直埋蜗壳数值仿真计算	55
3.4 溪洛渡水电站蜗壳数值仿真计算	77
参考文献	145
第 4 章 大型水电站蜗壳结构模型试验研究	147
4.1 二滩水电站充水保压蜗壳结构模型试验	147
4.2 三峡水电站充水保压蜗壳结构模型试验	154
4.3 小湾水电站充水保压蜗壳结构模型试验	165
4.4 瀑布沟水电站充水保压蜗壳结构模型试验	177
4.5 三峡水电站 15#机组直埋蜗壳结构模型试验	196
4.6 景洪水电站直埋蜗壳结构模型试验	209
参考文献	217

第5章 水电站充水保压蜗壳工程实例	218
5.1 三峡水电站水轮机蜗壳	218
5.2 二滩水电站水轮机蜗壳	242
5.3 广州抽水蓄能电站蜗壳	266
5.4 天荒坪抽水蓄能电站蜗壳	275
5.5 天生桥二级水电站蜗壳	281
5.6 岩滩水电站水轮机蜗壳充水保压结构方案	283
5.7 鲁布革水电站水轮机蜗壳	285
5.8 云南省腊庄水电站水轮机蜗壳	287
5.9 潘家口水电站抽水蓄能机组蜗壳	288
5.10 溪口抽水蓄能电站蜗壳	288
5.11 冷竹关水电站水轮机蜗壳	292
5.12 大古力、麦卡、列维尔斯托克水电站水轮机蜗壳	292
5.13 古里水电站水轮机蜗壳	293
5.14 依泰普水电站水轮机蜗壳	293
5.15 伊塔帕列卡、阿瓜凡梅拉、图库鲁伊、圣西毛水电站水轮机蜗壳	294
5.16 特里水电站水轮机蜗壳	297
参考文献	299
第6章 水电站垫层蜗壳工程实例	301
6.1 官厅水电站水轮机蜗壳	301
6.2 新安江水电站水轮机蜗壳	301
6.3 刘家峡水电站水轮机蜗壳	302
6.4 西洱河梯级水电站水轮机蜗壳	303
6.5 碧口水电站水轮机蜗壳	304
6.6 凤滩水电站水轮机蜗壳	305
6.7 白山水电站水轮机蜗壳	306
6.8 龙羊峡水电站水轮机蜗壳	307
6.9 岩滩水电站水轮机蜗壳	319
6.10 李家峡水电站水轮机蜗壳	322
6.11 龙滩水电站水轮机蜗壳	325
6.12 三峡水电站水轮机蜗壳	328
6.13 拉西瓦水电站水轮机蜗壳	331
6.14 布拉茨克水电站水轮机蜗壳	332
6.15 克拉斯诺亚尔斯克水电站水轮机蜗壳	339
6.16 契尔盖依水电站水轮机蜗壳	340
6.17 阿里·瓦赫塔水电站水轮机蜗壳	341
参考文献	343

第7章 直埋蜗壳的研究及工程实践	345
7.1 布拉茨克水电站直埋蜗壳结构的试验研究	346
7.2 克拉斯诺亚尔斯克水电站完全联合承载蜗壳方案研究设计	351
7.3 契尔盖依水电站机组完全联合承载蜗壳方案设计	363
7.4 乌斯季伊里姆斯克水电站完全联合承载蜗壳方案设计	365
7.5 努列克水电站完全联合承载蜗壳研究、设计和实践	365
7.6 英古里水电站完全联合承载蜗壳研究、设计和实践	373
7.7 萨扬舒申斯克水电站完全联合承载蜗壳研究、设计和实践	376
7.8 罗贡水电站机组完全联合承载蜗壳研究设计	386
7.9 德聂斯特洛夫斯克蓄能电站可逆机组完全联合承载蜗壳方案	388
7.10 布列依斯克水电站组合结构（半联合承载）蜗壳方案	389
7.11 龙羊峡水电站机组直埋蜗壳结构模型试验研究	391
7.12 三峡水电站机组直埋蜗壳	395
7.13 景洪水电站机组直埋蜗壳	412
参考文献	420
第8章 蜗壳结构型式选择及改进	423
8.1 蜗壳的技术要求	423
8.2 蜗壳结构型式选择	426
8.3 蜗壳结构的改进措施	428
附录	430

第 1 章 水电站蜗壳结构设计理论与技术综述

1.1 蜗壳结构型式

混流式水轮机蜗壳，特别是中高水头、大容量水轮机蜗壳，主要有三种结构型式：①充水保压蜗壳；②垫层蜗壳；③直埋蜗壳。

1.1.1 充水保压蜗壳

充水保压蜗壳在钢蜗壳安装好后，采取措施临时封闭蜗壳的进口和出口，向蜗壳内充水并加压到设定值，在保压和保温状态下，浇筑外围钢筋混凝土，并对未填实的部分进行灌浆。外围混凝土凝固后，即可卸压，放空钢蜗壳。现有工程实践中，钢蜗壳按承受全部设计内水压力设计及制造；外围钢筋混凝土（根据充水保压值的大小）按承受部分内水压力及其他荷载设计建造。

长期以来，美国多采用充水保压浇筑混凝土的蜗壳^[1~3]。这一方法最先被田纳西流域管理局在 20 世纪 30 年代初作为最优方法而推广。美国机械工程师协会（ASME）的压力容器标准规定所有压力容器都必须进行水压试验，蜗壳作为压力容器的一种，采用充水保压的形式，也就满足了 ASME 标准的要求。这样，水压试验和充水保压蜗壳就作为历史惯例而存在于美国。田纳西流域管理局和陆军工程师团几乎全部采用最大静水压作为充水保压的压力值，仅有少数几个工程采用过低于最大静水压下浇筑混凝土的做法。

加拿大对中高水头的大机组多采用充水保压蜗壳，其中有拉格朗德二级、丘吉尔瀑布等大水电站。

在巴西，200MW 以上的机组，即使水头不高，也采用充水保压蜗壳。

西欧大中型机组多采用充水保压蜗壳。

西方的单机容量超过 500MW 机组的水电站，如大古力、古里、伊泰普等水电站，无一例外都采用充水保压蜗壳^[4]。

此外，高水头、大容量的可逆式抽水蓄能机组采用充水保压蜗壳居多。

1991 年开始发电的天生桥二级电站 1~4#机组（单机容量为 220MW）是我国大型机组中最早采用充水保压蜗壳的。广州抽水蓄能电站一期工程、潘家口电站抽水蓄能机组、十三陵抽水蓄能电站、二滩水电站（单机容量为 550MW）、天荒坪抽水蓄能电站（单机容量为 300MW）、广州抽水蓄能电站二期工程均采用了充水保压蜗壳。三峡水电站的 26 台机组中有 21 台采用了充水保压蜗壳（另外 4 台为垫层蜗壳，1 台为直埋

蜗壳)。随着更多的大容量、高水头常规机组和大容量抽水蓄能机组的建设, 充水保压蜗壳在我国有更多应用的趋势。我国采用充水保压蜗壳的主要大中型电站见表 1.1.1。

表 1.1.1 我国采用充水保压蜗壳的大中型电站

电站名称	蜗壳直径/m	单机容量/MW	设计内水压力/MPa	最大静水压力/MPa	保压值/MPa
三峡水电站	12.4	700	1.395	1.18	0.70
小湾水电站	6.5	700	2.90	2.60	1.90
二滩水电站	7.2	550	2.31	1.94	1.94
瀑布沟水电站	8.0	600	2.45	1.89	1.40
广蓄一期	2.31	300	7.75	5.40	2.70
广蓄二期	2.09	300	7.75	5.40	4.50
天生桥二级	4.2	220	2.70	2.05	2.05
潘家口蓄能电站	4.7	90	1.20	0.90	0.60
十三陵蓄能电站	1.75	200	6.86	4.81	2.00
天荒坪蓄能电站	2.0	300	8.70	6.80	5.40

充水保压蜗壳运行过程中, 在内水压力不大于保压值时, 内水压力由钢蜗壳单独承受。内水压力大于保压值时, 大于保压值的那部分内水压力由钢蜗壳与外围混凝土共同承担。这是内水压力由钢蜗壳和外围钢筋混凝土联合承载的结构, 充水保压值越小, 联合承载的程度越大。这种蜗壳的保压值(一般不大于运行时最大静水压)总是低于其设计内水压力值的, 因此运行时钢蜗壳实际分担的内水压力值总会小于设计内水压力值, 其值取决于保压值的大小和钢蜗壳与外围混凝土联合承载时钢蜗壳所分担的内水压力, 而且可以通过合理选择保压值的大小进行调节。

充水保压蜗壳主要有以下一些优点:

(1) 钢蜗壳及外包混凝土内应力比较均匀。

(2) 运行时, 钢蜗壳能贴紧外包混凝土, 使座环、蜗壳与大体积混凝土结合成整体, 增加了机组基础的刚性, 能避免钢蜗壳在运行时承受动水压力的交变荷载和因此产生的变形, 也增加了其抗疲劳性能; 可以依靠外包混凝土减少蜗壳及座环的扭转变形。这些都能减少机组振动和变形, 有利于稳定运行。充水保压蜗壳对减少机组振动、保证机组运行稳定性的作用, 对于大型机组和抽水蓄能机组更加重要, 这也是这两种机组广泛采用充水保压蜗壳的主要理由。迄今为止, 国内外所有这种结构的钢蜗壳仍然按单独承受全部设计内水压力(包括水锤压力)来设计, 而大多在安装后进行超过其设计压力(通常取 1.5 倍)的水压试验。可见采用这种充水保压结构的目的, 主要是为了保证安全, 并减少外围混凝土承担的荷载。

(3) 钢蜗壳与外包混凝土之间的荷载分配比例可以根据需要选择, 而且荷载分配明确可靠。

充水保压浇筑混凝土的蜗壳, 既然是部分联合承载的结构, 从理论上说, 钢蜗壳可以不必按单独承受全部设计内水压力来设计, 而可按其分配到的荷载设计, 这样可以降低钢蜗壳的技术要求(材质、壁厚、工艺), 并使钢蜗壳与外围混凝土都比较充分发挥作用, 取得最优的配合, 这也是这种结构技术、经济上潜力之所在。但鉴于生产

实践中尚无这种设计先例,这种方案应用于大型及巨型机组,有待于研究的深入和实践经验的积累。

实现充水保压蜗壳,需要付出一定代价,主要是:

(1) 增加了加压设备的费用。

充水保压的主要设备是蜗壳进口闷头及座环内封环。这两件的重量一般为水轮机总重的10%。如果一套加压设备供4台机组使用,则相当于每台机增加了水轮机重的2.5%。例如,二滩水电站6台机组共用2个闷头及1套内封环,总重112t,相当于每台机组19t,占每台水轮机总重(1150t)的1.65%。充水保压蜗壳所需其他设备费用则较少。美国的经验表明,水压试验及充水保压所需每套设备包括闷头、内封环、泵及其他辅助设备的造价是机组造价的3%(如按每套设备供4台机组使用,则增加的造价是机组的0.75%)。但与垫层蜗壳相比,充水保压蜗壳省去了垫层及蜗壳内支撑,可以节省一定费用。

(2) 增加了机组安装工期。

根据国内常规机组蜗壳及进口的抽水蓄能机组进行水压试验及充水保压浇筑混凝土的实践,需要占用机组安装工期两周。对于新设计、机组尚未招标的电站,可以通过机组安装的总体进度安排,保证机组按期投产。充水保压蜗壳可以省去铺设垫层、安装内支撑的时间。蜗壳内的水重可以抵抗混凝土浇筑时的上浮力,因而可以省去拉固措施。可以通过蜗壳内水的循环调节其温度,有利于混凝土浇筑时的冷却,这些可提高混凝土浇筑速度,缩短工期。

1.1.2 垫层蜗壳

垫层蜗壳是在钢蜗壳安装好后,在其外表面上半圆铺设软垫层,然后浇筑外围钢筋混凝土。钢蜗壳按承受全部设计内水压力设计及制造;外围钢筋混凝土承受其他荷载,不考虑承受内水压力或根据垫层实际情况分析计算,承受小部分内水压力。

原苏联以前多采用垫层蜗壳。总装机容量为4600MW、单机容量为225MW及250MW的布拉茨克水电站,以及装机容量为5000MW,单机容量为500MW的克拉斯诺亚尔斯克水电站都用了垫层蜗壳。克拉斯诺亚尔斯克水电站及其500MW机组也是当时世界上采用垫层蜗壳的最大水电站和最大机组。蜗壳进口断面直径为8.7m,设计内水压力(包括水锤)为1.35MPa,HD值为1174.5m²。

西方国家及日本的水电站采用垫层蜗壳相对较少,巴西仅在200MW以下的机组采用垫层蜗壳。美国个别电站,如路丁顿抽水蓄能电站(装机6台,单机34.30MW,水头113m,日本日立机组)采用了垫层蜗壳。

我国以往大中型水电站的钢蜗壳,大都用外加垫层的做法。国内已经建成且于1997年开始发电的李家峡水电站全部机组采用这种结构,单机容量为400MW,装机5台,共2000MW。蜗壳承受静水压力约1.40MPa,HD值的设计值达1280m²。

随着对垫层蜗壳研究的不断深入,以及对蜗壳施工进度不断加快的要求,我国近几年来开始在单机容量为700MW级的水电站中采用垫层蜗壳,比如装机容量为9×

700MW 的龙滩水电站以及装机容量为 $6 \times 700\text{MW}$ 的拉西瓦水电站；在三峡右岸电站的 12 台机组中，也有 4 台机组采用了垫层蜗壳，这些工程正在建设中，部分机组已开始发电。国内外几个典型电站采用的垫层蜗壳有关参数见表 1.1.2。

表 1.1.2 国内外大型垫层蜗壳有关参数

电站名称	刘家峡	龙羊峡	李家峡	彭水	三峡	龙滩	拉西瓦	克拉斯诺 亚尔斯克
单机容量/MW	300	320	400	350	700	700	700	500
蜗壳进口直径/m	6.5	6.5	8.0	9.74	12.4	8.7	6.8	8.7
钢板最大厚度/mm	40	44	50	65	75	74	64	35
设计内水压力/MPa	1.40	1.80	1.64	1.40	1.395	2.42	2.76	1.30
屈服极限/MPa	400	490	490	490	490	490	470	400

垫层蜗壳结构只要钢蜗壳的材料选择正确，工艺及安排措施适当，蜗壳是可以安全工作的。但是这种结构存在着一些问题：

(1) 设计时由钢蜗壳单独承受内水压力，因此对钢蜗壳技术要求（材质、壁厚、工艺）高，钢板用量多。

(2) 壳体与座环连接处，特别是采用蝶形边连接时，壳体有弯曲应力，而且正好位于焊缝处，对强度不利；座环立柱的受力不够均匀；垫层末端处壳体有局部应力集中。

(3) 垫层总是具有一定的变形模量，其厚度也有限，而且钢蜗壳的下半部不设垫层而与混凝土直接接触，因而蜗壳内水压力不可能由钢蜗壳完全承担，必然有部分内水压力外传至外围混凝土结构上，外包钢筋混凝土应该考虑这部分荷载。外传压力的大小取决于垫层厚度及材料的变形性能。由于材料变形是非线性的，且可能随时间变化，要精确地计算传给混凝土的载荷也是比较困难的。

既然垫层可以传递部分内水压力到外围混凝土结构上，那么钢蜗壳承担的内水压力就会相应减少，因而理论上，钢蜗壳可以不按承受全部内水压力设计。钢蜗壳与外围混凝土分担内水压力的比值，可以通过改变垫层的参数来调节。但是迄今国内外尚无钢蜗壳不按全部内水压力设计、制造的垫层蜗壳的工程实例。

(4) 钢蜗壳与外包混凝土之间有垫层，二者不能完全结成刚性整体，对机组抗振和钢蜗壳抗疲劳不利。

这些问题，随着机组容量的增大，会更加明显。由于这些问题的存在，因此在超大型的机组中采用垫层蜗壳时，应有充分的研究与论证，并采取相应的有效工程措施。

1.1.3 直埋蜗壳

直埋蜗壳是在钢蜗壳安装好后，直接浇筑外围钢筋混凝土，即既不设垫层，也不充内水压力（有时称完全联合承载蜗壳）。这类蜗壳有两种构造：第一种是钢蜗壳按承受全部内水压力设计制造，外包混凝土按二者联合承载设计，承担部分内水压力；第

二是钢蜗壳不要求承受全部内水压力,钢蜗壳与外围混凝土二者均按联合承担全部内水压力的原理设计,也就是说,二者组成一个整体结构才能承担全部内水压力,这样,钢蜗壳和外围混凝土均可以按小于设计内水压力值设计制造。

直埋蜗壳(不论钢蜗壳是否按承受全部设计内水压力设计制造)运行时,钢蜗壳和外围钢筋混凝土总是联合承受荷载的,因此在受力上,是一种完全联合承载蜗壳。

原苏联是第二种蜗壳结构(即被称为钢衬钢筋混凝土蜗壳)的首创者^[5]。从 20 世纪 60 年代起,苏联结合布拉茨克和克拉斯诺亚尔斯克两座巨型水电站开展钢衬与钢筋混凝土联合承载结构的研究。首先,为了降低垫层蜗壳座环与蜗壳连接处的弯曲应力,取消了该处 1.5~2.0m 的软垫层,在局部区域实现钢蜗壳与外围钢筋混凝土的直接结合和联合承载,取得良好效果。后来相继在努列克水电站(单机容量为 300MW,蜗壳设计内水压力 3.8MPa)、英古里水电站(单机容量为 260MW,蜗壳设计内水压力 5.5MPa)、萨扬舒申斯克水电站(单机容量为 640MW,蜗壳设计内水压力 2.86MPa),实现了全部完全联合承载的蜗壳。在设计时,由钢衬和外包钢筋混凝土共同承受内水压力,不考虑由钢衬单独承受内水压力,因而钢衬可以采用强度较低的钢材并减薄。萨扬舒申斯克水电站及其 640MW 机组也是世界上迄今采用直埋蜗壳的最大水电站和最大机组。据俄罗斯专家称,完全有把握把这种结构应用于单机容量为 1000MW 的水轮机蜗壳。

北欧国家和日本采用完全联合承载蜗壳的较多,但是与原苏联不同。这些国家的钢蜗壳是按单独承受全部内水压力设计制造的,并不因有外包钢筋混凝土而将钢蜗壳减薄。但是由于钢蜗壳和混凝土之间没有设置人工间隙,蜗壳运行时,内水压力的相当大部分将传给外围混凝土,因此外围钢筋混凝土要按承受很大部分内水压力来设计,即所谓“双重设计”。

我国云南澜沧江上的景洪水电站经反复论证比较,采用了直埋蜗壳。共 5 台机组,单机容量为 350MW,蜗壳进口直径为 11.2m,设计内水压力为 0.96MPa。首台机组 2008 年 5 月投产。经长期试验研究和设计论证,三峡水电站右岸厂房 15#机组,也采用了直埋蜗壳,并已于 2008 年 11 月投产发电。这是世界上单机容量最大的直埋蜗壳。景洪和三峡电站直埋蜗壳的钢蜗壳仍是按承受全部设计内水压力设计和建造的。

国内外大型直埋蜗壳具体参数列于表 1.1.3。

表 1.1.3 国内外大型直埋蜗壳有关参数

电站名称	景洪	三峡 15#机组	努列克	英古里	萨扬舒申斯克
单机容量/MW	300	700	300	260	640
蜗壳进口直径/m	11.2	12.4	4.2	3.0	6.5
钢板最大厚度/mm	40	75	32	36	40
设计内水压力/MPa	0.96	1.395	3.80	5.50	2.86
屈服极限/MPa	320	490	300	300	400

直埋蜗壳的钢蜗壳只承受部分内水压力。这种结构的优越性是明显的:运行时,在任何水头下,钢蜗壳与外围钢筋混凝土始终结成整体,结构刚度高,抗振性能好,

对机组运行有利；用钢筋替代部分钢板，可以减少钢板厚度和降低钢板强度等级，从而缓解钢蜗壳制作的技术困难，有利于保证质量，而且可以取得经济效益；减少钢板厚度可以减少钢蜗壳安装、焊接和检验的时间，缩短工期。这种结构在原苏联总容量为 10400MW 的三个高水头电站共 24 台大单机容量的机组中已有了成功建设和运行 30 余年的经验。在我国这类蜗壳的工程实践经验还很少，研究工作也还做得不充分，因此采用时需要更多的设计和研究工作，而钢蜗壳和外包混凝土的设计必须紧密配合、统一进行。

“双重设计”的蜗壳，其安全性是很高的，但外包混凝土负担重，造价高。

蜗壳的三种结构型式，如果从它承担荷载（主要是蜗壳内水压力）的工作机理分析，可以说都是钢蜗壳和外围混凝土联合承载的结构，只是联合承载的方式和程度不同。垫层蜗壳如果垫层用得较厚，钢蜗壳将承担大部分内水压力，外围混凝土仅承担小部分内水压力，甚至在工程上可以忽略，这正是采用垫层蜗壳的重要目的。充水保压蜗壳可以明确地调节钢蜗壳和外围混凝土分担内水压力的比例。直埋蜗壳相当于垫层厚度为零的垫层蜗壳或者保压值为零的充水保压蜗壳。

根据现有工程实践，蜗壳的三种结构型式，从构造上分析，只有直埋蜗壳做到了钢蜗壳可以减薄，不单独承担全部内水压力设计。至于对外围混凝土结构的强度，垫层蜗壳要求最低，充水保压蜗壳次之，直埋蜗壳要求最高。

蜗壳的三种结构型式，要求不同的材料、工艺、施工方法和工期。它们在运行时的应力状态不同，结构刚度和抗机组振动的性能不同。在电站建设中，特别对于大容量、大尺寸机组，应根据具体情况，全面、综合地进行分析，选择最优的蜗壳结构型式。

1.2 水电站蜗壳发展概况

西方国家的大中型水电站普遍采用充水保压蜗壳，直到 20 世纪末和 21 世纪初，西方的著名水轮发电机组供应厂商仍然向我国水电站推荐这种形式。少数国家，在一些单机容量为 300MW 左右及更小的机组采用垫层蜗壳和直埋蜗壳，但未见在更大的机组推广应用^[8~14]。

原苏联在第二次世界大战后大力进行水电建设，由于采取立足国内、自主创新的方针，对高水头、大容量机组蜗壳结构，进行了长期的研究和工程实践，经历了从垫层蜗壳到直埋（减薄钢蜗壳并与外围钢筋混凝土完全联合承载）蜗壳的发展过程，并积累了比较丰富的经验。

新中国成立后，我国逐步开展大规模水电建设，在改革开放以前的电站，单机容量不很大，几乎都是根据原苏联的方法和经验，采用垫层蜗壳，但在垫层材料方面，逐步有所改进。改革开放以来，开始更多吸收西方国家技术，从中等容量直到二滩、三峡电站这样的巨型机组，开始比较广泛地采用充水保压蜗壳，并很快在制造、安装等方面完全掌握了此技术。同时为了更全面地拓宽和创新蜗壳结构技术，开始在大型、巨型机组中研究采用垫层蜗壳和直埋蜗壳。

鉴于我国在蜗壳结构技术发展上的继承性，原苏联在这方面长期、系统的研究成